

文章编号: 0253-2697(2016)03-0371-11 DOI:10.7623/syxb201603009

随钻电磁波电阻率测井联合反演方法及其应用

蔡 军^{1,2} 张恒荣² 曾少军² 高永德² 程远方¹

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057)

摘要:针对海上油气田高正压差井筒条件下随钻测井电阻率受钻井液低侵影响的问题,提出了随钻电磁波电阻率测井联合反演方法,设计了一种基于视电阻率曲线分离程度的反演初始值选取方案,通过反演可以获得原始地层电阻率和钻井液侵入深度。数值模拟结果显示,初始值选取精度满足工程应用需求,地层真电阻率和钻井液侵入深度参数反演相对误差小于 0.5%。时间推移测井资料分别反演所得地层真电阻率一致,表明该方法稳定可靠。对中国南海西部东方区块随钻测井资料开展电阻率反演应用研究,结合反演成果开展了钻井液侵入规律统计,得到了钻井液侵入深度与地层孔隙度、渗透率、钻井液柱压力、钻井液浸泡时间及地层电性变化等参数的统计关系,其对钻井液侵入预测与评价具有参考价值。该电阻率联合反演方法可推广应用于其他海域随钻电磁波电阻率测井,对储层评价与储量计算具有重要意义。

关键词:随钻测井;电磁波;电阻率;联合反演;钻井液侵入;时间推移测井

中图分类号:P618.1

文献标识码:A

Joint inversion method of electromagnetic wave resistivity logging while drilling and its application

Cai Jun^{1,2} Zhang Hengrong² Zeng Shaojun² Gao Yongde² Cheng Yuanfang¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China;

2. Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Guangdong Zhanjiang 524057, China)

Abstract:In view of the fact that the electromagnetic wave resistivity logging while drilling (LWD) is affected by low invasion of drilling fluid under the condition of a shaft with positive high pressure difference in offshore oil and gas fields, a joint inversion method of electromagnetic wave resistivity logging while drilling was proposed in this study. Then a selection scheme of initial inversion value was designed based on the separation degree of apparent resistivity curves, so as to obtain the original formation resistivity and drilling-fluid invasion depth through inversion. Numerical simulation results show that the accuracy of initial value selection can meet the requirements of engineering application, and the relative errors of inversion parameters such as true formation resistivity and drilling fluid invasion depth are less than 0.5%. The true formation resistivity obtained through respective inversion of time-lapse logging data is consistent, proving that this method is steady and reliable. A resistivity inversion application study was carried out according to LWD data in western South China Sea. In combination with inversion results, the statistics were performed on drilling-fluid invasion laws to obtain the statistical relationship between drilling-fluid invasion depth and various parameters such as formation porosity, permeability, drilling-fluid column pressure, drilling-fluid soaking time and formation resistivity variation, etc., which provides a reference for the prediction and evaluation of drilling-fluid invasion. This joint resistivity inversion method can be applied to LWD in other seawaters, and has great significance to reservoir evaluation and reserve calculation.

Key words:logging while drilling;electromagnetic wave; resistivity;joint inversion;mud-filtrate invasion; time lapse logging

引用:蔡军,张恒荣,曾少军,高永德,程远方.随钻电磁波电阻率测井联合反演方法及其应用[J].石油学报,2016,37(3):371-381.

Cite:Cai Jun,Zhang Hengrong,Zeng Shaojun,Gao Yongde,Cheng Yuanfang.Joint inversion method of electromagnetic wave resistivity logging while drilling and its applications[J].Acta Petrolei Sinica,2016,37(3):371-381.

随钻电阻率测井在钻开地层后快速进行地层电阻率测量,比常规电缆电阻率测井能够获取更接近原始地层的电性参数,并因其良好的时效性而在地层评价

与地质导向中发挥着重要的作用^[1,2]。然而,对于海上高压油气田,因安全钻进的需求,通常采用海水配制的高比重高矿化度钻井液,这导致井筒钻井液柱压力与地层孔

基金项目:中国海洋石油总公司“十二五”重大专项“南海西部海域典型低孔低渗油气藏勘探开发关键技术研究及实践”(CNOOC-KJ125ZDXM07LTD02J11)资助。

第一作者及通信作者:蔡军,男,1971年11月生,1994年毕业于江汉石油学院矿场地球物理专业,现为中国石油大学(华东)油气井工程专业博士研究生、中国海洋石油总公司湛江分公司勘探专家、高级工程师,主要从事测井综合应用研究工作。Email:caijun@cnooc.com.cn

隙压力存在超过 3.45~6.89 MPa (500~1 000 psi)的正压差。由于正压差的存在和钻井液封堵性能差的原因,对于取心或因故障停钻等造成钻井液长期浸泡的地层,钻后复测的电阻率明显受钻井液侵入影响,在物性好的地层,即使随钻测量电阻率也会受钻井液侵入的影响^[3,4]。

目前,随钻电阻率测井反演仍主要采用图版校正法,根据仪器相应的解释图版逐步进行井眼、相对夹角(井斜角或地层倾角)、非均质各向异性、介电影响、围岩(层厚)影响及钻井液侵入校正^[5-8],该方法步骤繁琐且无法去除测井环境对测井响应的非线性综合影响^[9];另一种常见的方法是反褶积算法^[10]或一维迭代反演^[11],其可有效提高仪器纵向分辨率,但只考虑了围岩的影响;冯庆国和杨善德^[12]研究了电磁波传播电阻率测井的二维迭代反演,发现存在钻井液侵入时分别由幅度衰减或相位差资料很难反演得到地层电阻率的真值,即此时反演问题解释的不适定性已相当严重,必须增加约束条件或测井信息量。康俊佐等^[9,13]针对 MPR(Multiple Propagation Resistivity)、EWR(Electromagnetic Wave Resistivity)仪器数值模拟测井响应开展了同时利用幅度衰减和相位差电阻率的二维迭代反演,得到了令人满意的结果,但未开展实测资料反演。

总之,电阻率测井响应的反演属于非线性问题,单一测井信息的片面性与反演的不适定性增加了测井反演、测井解释与评价的难度^[14],多参数多曲线反演成为测井反演的发展趋势^[15]。中国南海西部海域东方区块为一高压气田,勘探阶段 20 余口井的目的层井段均采用了斯伦贝谢 ARC675 型随钻电磁波电阻率测井仪器(简称 ARC675)进行测量,其普遍存在电阻率测井受钻井液低侵影响的现象。随钻电阻率各测井曲线响应差异能够定性指示钻井液侵入状况,但储层电性评价和储层污染状况的评估则需要地层的真电阻率和钻井液侵入深度,获得此 2 种参数需要一种针对随钻电磁波电阻率的有效反演方法。针对该区域随钻电磁波电阻率的实际测量状况,笔者综合 2 MHz、400 kHz 这 2 种工作频率下相位差与幅度衰减电阻率测井信息,开展了随钻电磁波电阻率测井联合反演,增加了有效信息量,进而可以获取地层真电阻率和钻井液侵入深度,并同时进行了东方区块随钻电阻率测井资料电阻率反演应用和钻井液侵入规律研究。

1 测量原理与探测特性

随钻电磁波电阻率测井是电磁波测井的一种,采用了阵列线圈系以改善径向特性,其基本结构单元是单发双收的三线圈系结构。随钻电磁波电阻率测井仪器发射线圈发出的电磁波,经过地层介质到达接收线

圈。随钻电阻率测井通过接收线圈对电磁场的幅度和相位的测量来反映地层介质的电性。而电磁场的幅度和相位可由介质中电磁波满足波动方程来确定^[16,17]。其中幅值和相位是地层电导率的函数。

若实际测得接收线圈 R1 的电动势为 V_1 、接收线圈 R2 的电动势为 V_2 ,则根据模值 $|V_1|$ 和 $|V_2|$ 、相位角 ϕ_1 和 ϕ_2 ,可得幅度衰减 E_{ATT} 和相位差 $\Delta\phi$ 分别为:

$$E_{ATT} = 20 \lg \frac{|V_1|}{|V_2|} \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2)$$

根据实际测井记录的幅度衰减与相位差,经电阻率工程转换^[18],可分别得到随钻测井的幅度衰减电阻率和相位差电阻率。

以积分径向几何因子 IRPGF(Integrated Radial Pseudo Geometrical Factor)函数^[19]来确定随钻电阻率测井探测深度(由井轴中心开始沿径向计算):

$$IRPGF(d_p, \sigma_{xo}, \sigma_t) = \frac{\sigma_a - \sigma_t}{\sigma_{xo} - \sigma_t} \quad (3)$$

探测深度定义为满足以下条件时的 d_p 值:

$$IRPGF(d_p, \sigma_{xo}, \sigma_t) = 1/2 \quad (4)$$

从地层电阻率为 $10 \Omega \cdot m$ 、侵入带电阻率为 $1 \Omega \cdot m$ 的条件下 ARC675 高频(2 MHz 工作频率)相位差探测特性可知[图 1(a)],源距越长探测深度越深,P40H 测井探测深度为侵入直径的一半约 0.64 m。从针对长源距不同工作频率下幅度衰减与相位差电阻率探测特性的考查可知[图 1(b)],各曲线探测深度大小关系有 $A40L > A40H > P40L > P40H$,其中 A40L 测井探测深度约为 1.27 m。从地层电阻率为 $10 \Omega \cdot m$ 、围岩电阻率为 $1 \Omega \cdot m$ 的条件下 ARC675 型分辨率可知[图 1(c)、图 1(d)],各层层厚依次为 0.2 m、0.3 m、0.5 m、1.0 m、2.0 m、5.0 m。可以看出 ARC675 型分辨率与探测深度特性互补:源距越短分辨率越高,P16H 测井分辨率(按视电阻率达到地层电阻率的 50%)约为 0.6 m,且分辨率大小关系有 $A16L < A16H < P16L < P16H$ 。

对于 ARC 型随钻测井仪器,其常用的 2 MHz 工作频率下的电阻率测井信息存在片面性,尤其是由于趋肤效应的影响,其探测深度较浅,受钻井液侵入影响严重,在钻井液侵入影响严重时,其难以表征地层真实的电阻率信息^[16],但其分辨率高;幅度衰减电阻率探测深度深,受钻井液侵入影响小,但其分辨率低。本文利用随钻电阻率测井分辨率与探测深度的互补特性开展随钻电阻率测井联合反演,实现了对不同工作频率下幅度衰减与相位差电阻率测井的分辨率与探测深度的有效匹配,获取了真实地层电阻率和钻井液侵入深度。

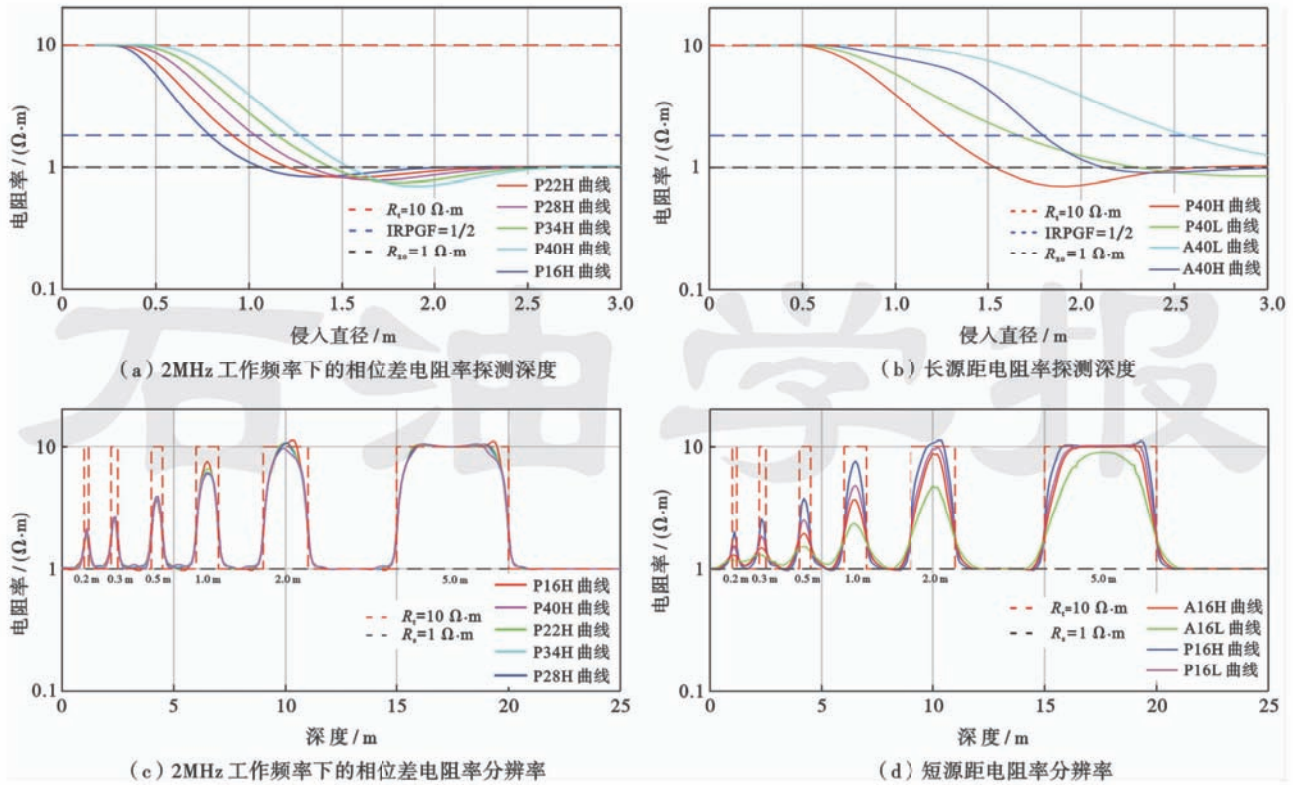


图 1 ARC675 电阻率测井探测特性

Fig. 1 Investigating characteristics of ARC675 resistivity logging

2 电阻率联合反演方法

采用马奎特迭代算法,构造最小二乘目标函数^[20]:

$$z(x) = \sum_{k=1}^m [y_k - f_k(x)]^2 \quad (5)$$

对于随钻 ARC 系列 20 条电阻率测井曲线(包括 2 MHz 和 400 kHz 工作频率下的幅度衰减与相位差电阻率)联合反演,其中正演采用有限元素法^[21,22]。开展二维阶梯模型的三参数反演,待反演参数 x 包括:侵入带半径 r_i 、随钻侵入带电阻率 R_{xo} 、地层电阻率 R_1 ,共 3 组地层模型参数。

为合理选取迭代反演所需各参数初始值,本文设计了一种基于视电阻率曲线分离程度的反演初始值选取方案。图 2 为通过正演仿真所得 ARC675 电阻率测井响应随钻井液侵入深度的变化特征(中国南海西部电阻率背景,井径 8.5 in(21.59 cm),钻井液电阻率 $0.02 \Omega \cdot m$,层厚 3.0 m,围岩电阻率 $6.0 \Omega \cdot m$,渗透层侵入半径 $0 \sim 1.6 m$,侵入带电阻率 $3.0 \Omega \cdot m$,地层电阻率 $15.0 \Omega \cdot m$):①第 3 道至第 6 道分别为 2 MHz 相位差电阻率、400 kHz 相位差电阻率、2 MHz 幅度衰减电阻率、400 kHz 幅度衰减电阻率的不同源距电阻率,其均随侵入深度的增加而逐渐偏离地层真电阻率,并趋向于侵入带电阻率;②第 3 道至第 6 道中各道不同源距电阻率曲线间的分离程度均随侵入深度的增加而先增大后减

小;③第 3 道至第 6 道中各道不同源距间电阻率曲线的分离程度随着侵入深度的增加依次先后出现极大值。

基于图 2 所示正演仿真的电阻率背景及获得的测井响应随钻井液侵入深度变化特征,根据不同探测深度电阻率测井曲线分离程度变化差异,进行钻井液侵入深度定性判别和反演各参数的初始值选取。首先,考查常用的 2 MHz 电阻率曲线,定义 P40H、P16H 曲线的分离因子 S_{phls} 和 A40H、P40H 曲线分离因子 S_{lhap} :

$$S_{phls} = (R_{P40H} - R_{P16H}) / R_{P16H} \quad (6)$$

$$S_{lhap} = (R_{A40H} - R_{P40H}) / R_{P40H} \quad (7)$$

相关曲线随侵入深度变化的响应特征如图 2 第 7 道所示,经三次样条插值拟合, S_{phls} 、 S_{lhap} 与侵入半径大小关系如图 3(a)所示。可由 S_{phls} 、 S_{lhap} 大小定性判别钻井液侵入深度。

其次,结合 2 MHz 和 400 kHz 的相位差和幅度衰减电阻率,分别定义其长、短源距电阻率曲线分离因子:

$$S_{pils} = (R_{P40L} - R_{P16L}) / R_{P16L} \quad (8)$$

$$S_{ahls} = (R_{A40H} - R_{A16H}) / R_{A16H} \quad (9)$$

$$S_{alls} = (R_{A40L} - R_{A16L}) / R_{A16L} \quad (10)$$

各电阻率与侵入半径大小关系如图 3(b)所示。由于该组电阻率曲线探测深度差异大,可在钻井液侵入影响严重时进一步区分侵入程度。

再次,利用常用的 2 MHz 相位差电阻率曲线,分

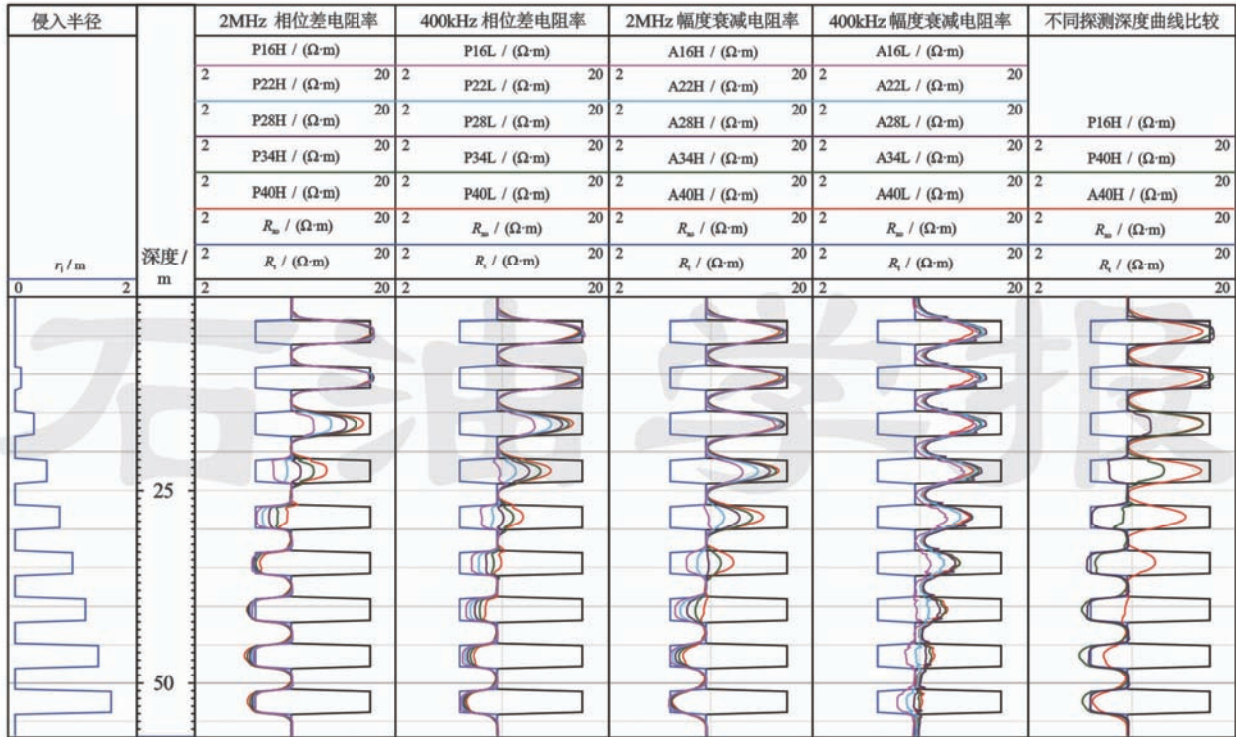


图2 钻井液低侵影响下 ARC675 电阻率测井响应特征

Fig. 2 Response characteristics of ARC675 resistivity logging under the influence of conductive mud-filtrate invasion

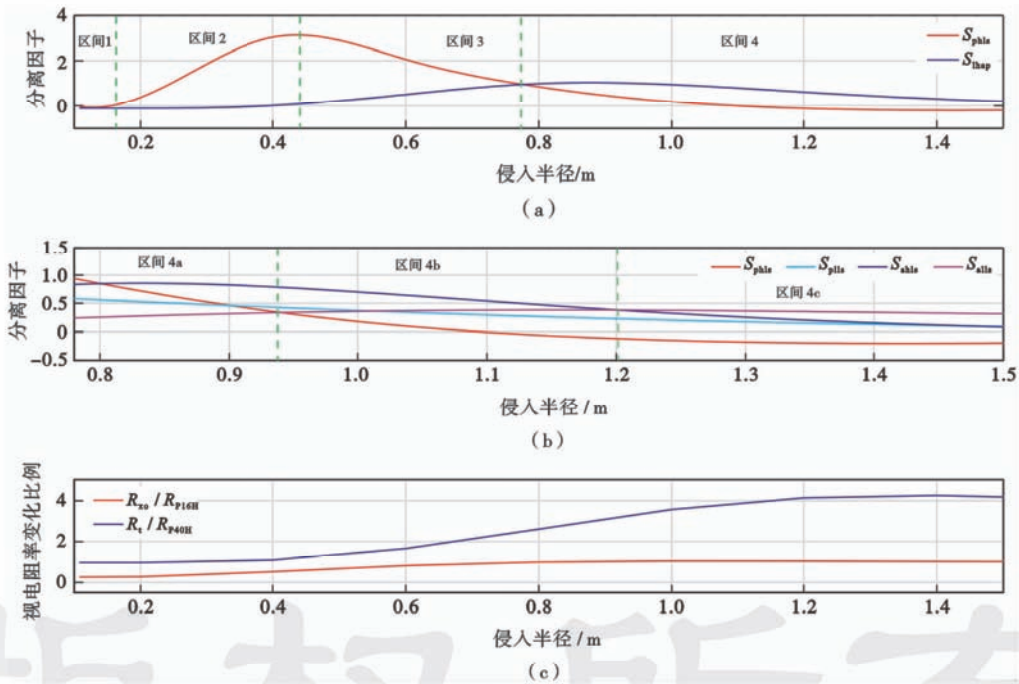


图3 ARC675 电阻率测井曲线分离因子、变化比例与侵入半径关系

Fig. 3 Relationship among separation factor, proportion and invasion radius of ARC675 resistivity logging curves

别考查视电阻率变化比例 R_{so}/R_{P16H} 、 R_1/R_{P40H} 与侵入半径大小关系[图3(c)]。可在定性判别侵入深度后,根据该关系相应地定性判别 R_{so} 和 R_1 的大小。

根据图3所示的分离因子、变化比例与侵入半径大小关系获得反演参数初始值选取方案如表1所示。该方案能够定性区分1.5 m以内的侵入深度,并相应选取反演各参数初值。表1中所示的判别准则是基于

随钻电阻率测井不同频率的、不同源距的幅度衰减和相位差电阻率曲线间固有的探测深度差异,比较不同探测深度曲线分离程度的相对大小而非绝对差异,进而定性判别钻井液侵入程度,因此该准则对于海上随钻电阻率测井受钻井液低侵影响情形具有普适性。在此定性判别的基础上,定量选取的反演参数初始值需经迭代反演计算而逐步收敛于真实值。

表 1 ARC675 电阻率测井钻井液侵入深度定性判别准则与反演参数初始值选取方案

Table 1 Qualitative identification of mud-filtrate invasion depth and selection scheme of the initial value of inversion parameters for ARC675 resistivity logging

定性判别区间	判别准则	结论	初始值选取方案		
			r_{i0}/m	R_{x00}/R_{P16H}	R_{i0}/R_{P40H}
区间 1	$S_{phls} < 0.1$ 且 $S_{hlap} < 0.1$	无侵	井眼半径	约束 $R_{x0} = R_i$	1.00
区间 2	$S_{phls} \geq 0.1$ 且 $S_{hlap} < 0.1$	浅	0.30	0.40	1.00
区间 3	$S_{phls} \geq S_{hlap}$ 且 $S_{hlap} > 0.1$	中等	0.60	0.80	1.60
区间 4a	$S_{alls} < \min(S_{phls}, S_{phls}, S_{ahls})$	较深	0.85	1.00	2.85
区间 4 区间 4b	$S_{phls} < S_{hlap}$ $S_{alls} < S_{ahls}$ 且 $S_{alls} \geq S_{phls}$	深	1.05	1.00	3.70
区间 4c	$S_{alls} \geq \max(S_{phls}, S_{phls}, S_{ahls})$	特深	1.35	1.00	4.30

3 数值算例

根据实际情况建立地层模型,模型设置为:均匀地层;地层厚度为 4.0m;井眼直径 $d_h = 0.2159m(8.5in)$;钻井液电阻率 $R_m = 0.1 \Omega \cdot m$;各层 r_i, R_{x0}, R_i 模型值设置如表 2 所示。根据表 2 所示参数设置,对该模型进行正演,以正演结果作为测井数据进行反演。

根据曲线分离程度选取各层反演参数初值 r_{i0}, R_{x00}, R_{i0} ,初值选取结果及其相应误差 $E_{r_{i0}}, E_{R_{x00}}, E_{R_{i0}}$ 如表 2 所示,6 层共 18 个参数中 15 个参数选取的初值相对模型值误差小于 30%。可见,本文设计的如表 1 所示的初始值选取方案适用于电性较复杂的地层,其精度满足工程应用需求。

通过联合反演计算,经 5 步迭代,获得收敛的反演结果,结果如图 4 所示,反演结果参数值 r_{i1}, R_{x01}, R_{i1} 及

表 2 模型参数设置、反演初始值、反演结果及误差

Table 2 Setting of model parameters, initial value and results of inversion, and error

深度		模型值			初始值			相对误差			反演结果			相对误差		
层顶/m	层底/m	r_i/m	$R_{x0}/(\Omega \cdot m)$	$R_i/(\Omega \cdot m)$	r_{i0}/m	$R_{x00}/(\Omega \cdot m)$	$R_{i0}/(\Omega \cdot m)$	$E_{r_{i0}}/\%$	$E_{R_{x00}}/\%$	$E_{R_{i0}}/\%$	r_{i1}/m	$R_{x01}/(\Omega \cdot m)$	$R_{i1}/(\Omega \cdot m)$	$E_{r_{i1}}/\%$	$E_{R_{x01}}/\%$	$E_{R_{i1}}/\%$
1000	1004	0.1080	3.0000	3.0000	0.1080	3.0051	3.0051	0	0.1700	0.1700	0.1080	3.0051	3.0051	0	0.1700	0.1700
1004	1008	0.5000	10.0000	15.0000	0.3000	4.8008	14.3307	40.0000	51.9920	4.4620	0.4984	9.9804	14.9947	0.3200	0.1960	0.0353
1008	1012	0.8000	8.0000	20.0000	0.8500	8.7021	33.4018	6.2500	8.7763	67.0090	0.8001	7.9998	20.0044	0.0125	0.0025	0.0220
1012	1016	0.6000	5.0000	10.0000	0.6000	4.5530	12.5825	0	8.9400	25.8250	0.6001	5.0001	9.9999	0.0167	0.0020	0.0010
1016	1020	0.7000	7.0000	18.0000	0.6000	6.3735	18.7787	14.2857	8.9500	4.3261	0.7005	7.0021	18.0189	0.0714	0.0300	0.1050
1020	1024	0.1080	3.0000	3.0000	0.1080	2.9865	2.9865	0	0.4500	0.4500	0.1080	2.9865	2.9865	0	0.4500	0.4500

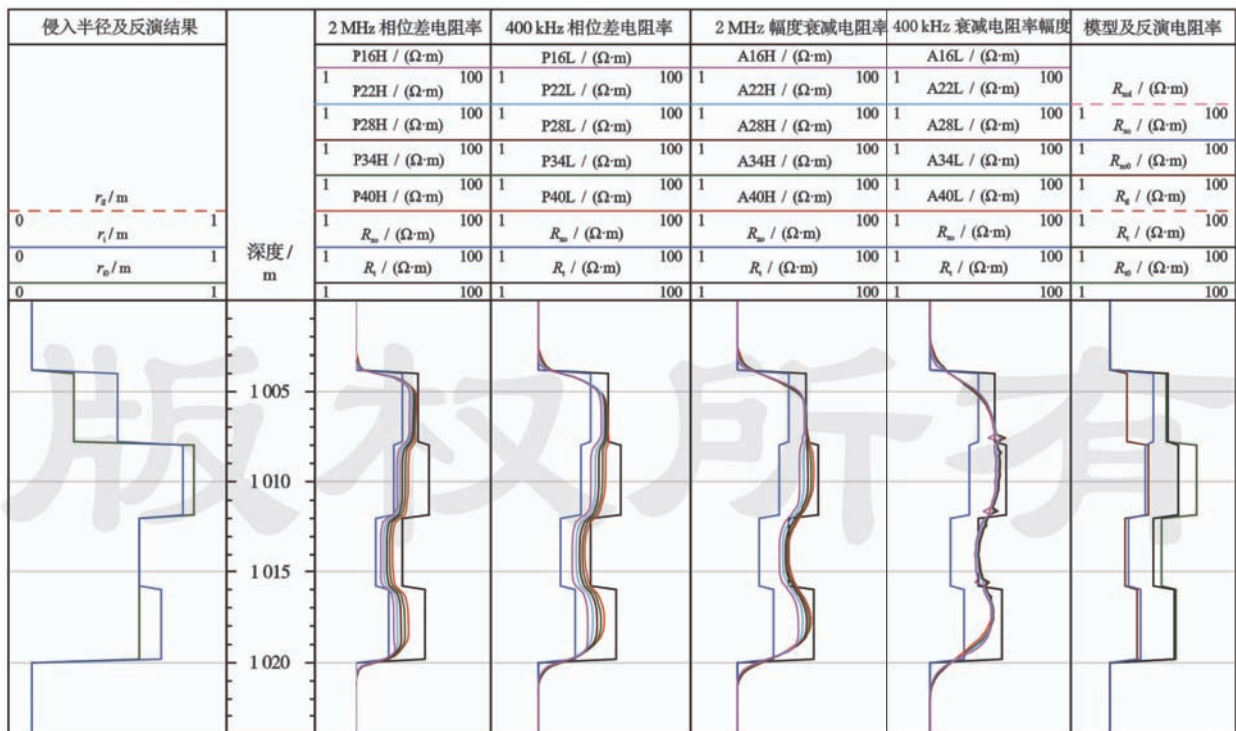


图 4 模型随钻迭代反演结果

Fig. 4 Results of iterate inversion of resistivity logging while drilling model

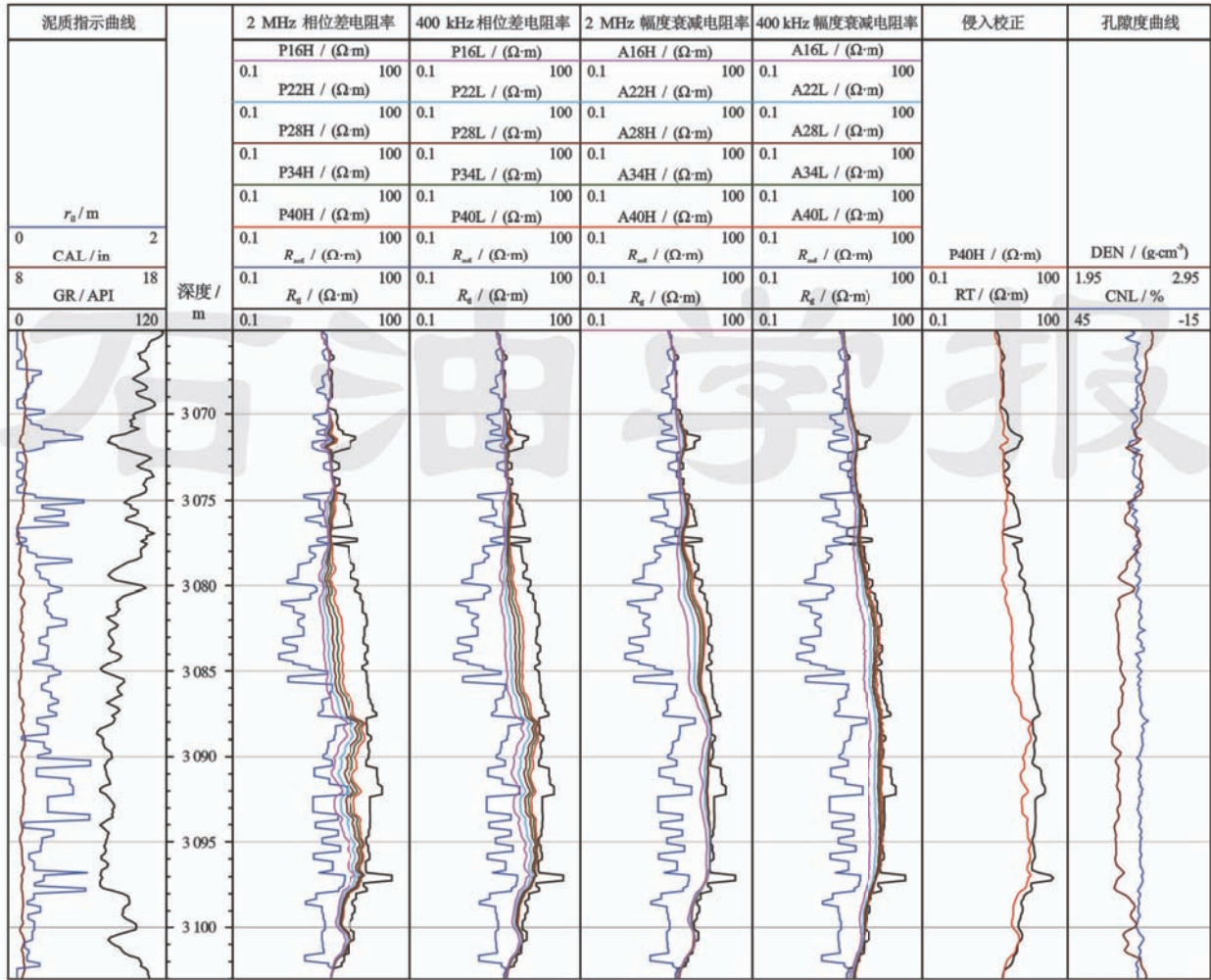


图5 东方区块 A 井 ARC675 电阻率测井反演及钻井液侵入校正

Fig. 5 Inversion and mud-filtrate invasion of ARC675 resistivity logging of Well A in East area

其相应的误差 E_{r1} 、 $E_{R_{so1}}$ 、 $E_{R_{t1}}$ 如表 2 所示。反演结果显示,各参数反演结果相对误差小于 0.5%。

4 资料处理与应用

本文采用联合反演方法提高了随钻电阻率反演的精度。然而,电阻率反演速度慢是制约电阻率反演走向工程化应用的重要因素^[23]。因此,通过开发随钻电阻率反演多线程并行计算软件,可以有效提高计算速度,满足工程应用需求。中国南海西部海域东方区块的地层孔隙压力系数在 1.70~1.90,基于钻井安全考虑,钻井液一般采用比孔隙压力系数高 0.2 的高比重钻井液,但其封堵性能较差,随钻测井存在较严重的钻井液低侵现象,因此随钻测井视电阻率必须经过校正才能为储层评价提供可靠的地层真电阻率。本文利用自主开发的软件对该区 13 口井的随钻测井资料开展电阻率反演及侵入校正,并进一步检验算法的可靠性。

4.1 随钻测井电阻率反演及验证

图 5 为中国南海西部海域东方区块 A 井 3065~3105 m 井段随钻电阻率测井反演及钻井液侵入校正结果。

该井在 3074.67~3092.67 m 井段进行了取心,该井段仪器电阻率测量点距钻头 13.92 m,因此在取心前电阻率测量只进行到了 3060.75 m,取心后更换了钻头(测量点距钻头 6.33 m)对该井段进行了电阻率补测,补测时钻井液浸泡时间在 1 d 以上。如图 5 所示,由于钻井液侵入的影响,探测深度不同的各曲线存在分离现象,其中,2 MHz 相位差电阻率曲线偏离地层电阻率最大。

通过 20 条电阻率曲线的联合反演,获得地层真电阻率和钻井液侵入状况。由图 5 所示的反演结果可知,该段储层钻井液侵入深度约 0.4 m,反演所得地层电阻率较视电阻率明显提高,如 3082~3085 m 储层,2 MHz 相位差测井视电阻率(包括长源距 P40H)均小于 10 Ω·m,反演所得地层真电阻率约为 20 Ω·m。

本文根据反演所得地层真电阻率,通过正演计算仪器响应值,该值为钻电阻率测井在无钻井液侵入条件下的响应,其结果如图 5 中第 7 道“侵入校正”道中的 RT(真电阻率)所示。

对于实际测井资料电阻率反演成果的可靠性,采

用对比时间推移电阻率测井分别反演所得地层电阻率的一致性进行验证。中国南海西部东方区块多口井在完钻后起钻的过程中进行了随钻电阻率复测。图 6(a) 所示为该区块 A 井、B 井和 C 井随钻主测(含取心后补测)和钻后复测分别所得的 2 MHz 工作频率下长源距相位差电阻率 P40H1 与 P40H2 比较,其中 A 井复测电阻率明显低于主测电阻率。对主测与复测电阻率分别反演得到地层电阻率 R_{t1} 与 R_{t2} 进行了对比,如图 6(b)所示。 R_{t1} 与 R_{t2} 相对误差小于 10%,且满足:

$$\frac{|R_{t1} - R_{t2}|}{(R_{t1} + R_{t2})/2} \leq 10\% \quad (11)$$

可见,无论主测与复测的视电阻率差异大小,无论是否钻井取心,主测与复测分别反演所得的地层电阻率结果均基本一致,表明本文实现的反演算法稳定,实际测井资料电阻率反演成果可靠。

4.2 钻井液侵入规律统计

在电阻率反演的基础上,统计了地层真电阻率与随钻测井视电阻率的大小关系(图 7)。统计结果显

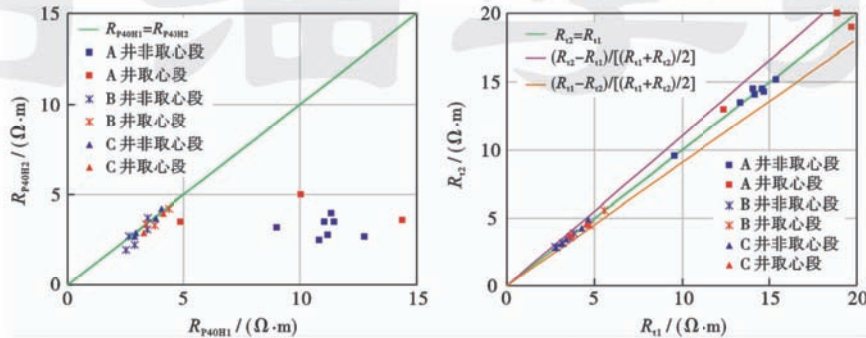


图 6 时间推移电阻率测井视电阻率比较与反演结果对比验证

Fig. 6 Comparison of apparent resistivity data, contrast and reliability validation of the inversion results data of time-lapse resistivity logging

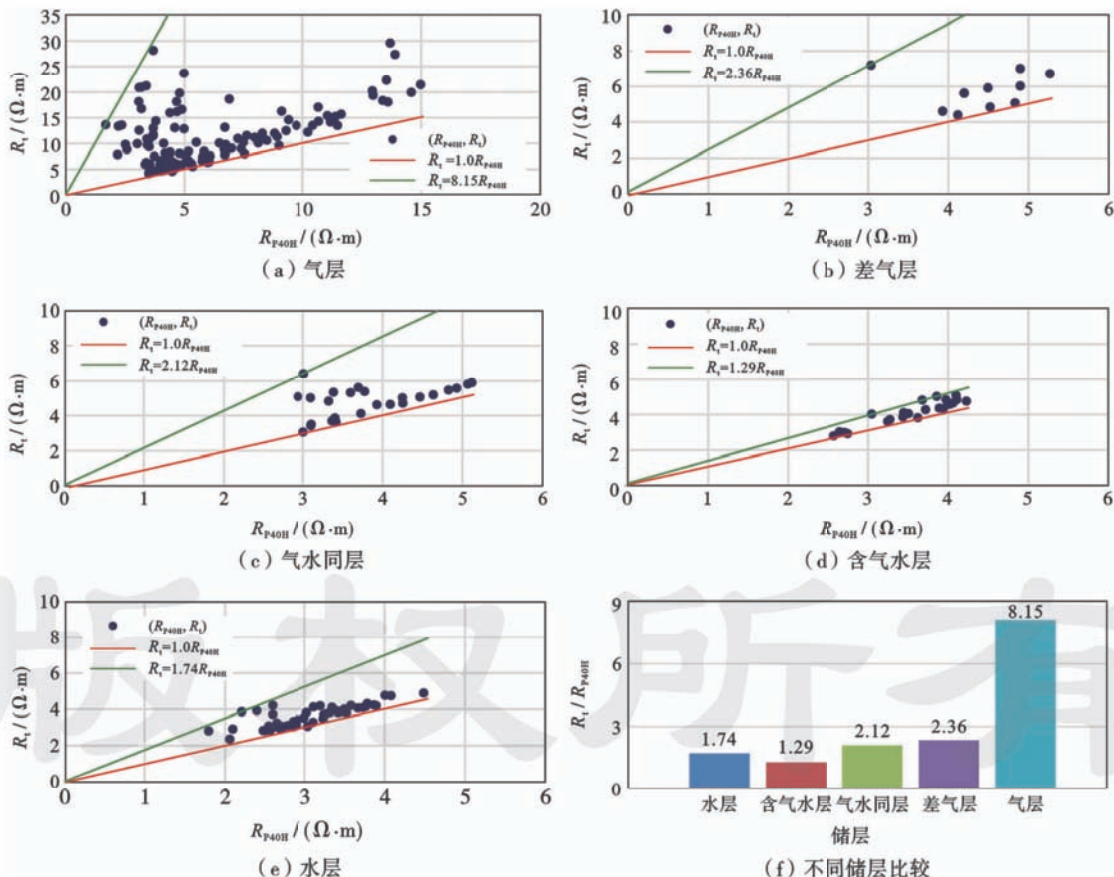


图 7 不同储层 R_t/R_{P40H1} 倍数动态范围比较

Fig. 7 Dynamic ranges of the value of R_t/R_{P40H1} from different reservoirs and its comparison

示:含油(气)饱和度越高的储层,原始地层电阻率 R_i 与 R_{P40H} 的相对倍数的动态范围越大,气层 R_i 与 R_{P40H} 的相对倍数的动态范围越大,倍数最大值甚至达到 8.1,表明钻井液低侵情形下可能会对气层随钻电阻率测井造成严重影响;水层 R_i 与 R_{P40H} 的相对倍数最大值为 1.7,表明水层随钻电阻率测井也受钻井液低侵影响,但总体上小于气层所受的影响。由此可见,海上随钻电阻率测井和常规电缆测井一样,通过电阻率反演进行电阻率测井的综合环境校正十分必要,这对于

储层评价与储量计算具有十分重要的意义。

针对受钻井液低侵影响严重的气层,进一步开展了钻井液侵入规律多元统计。根据详细钻井日志信息,整理出了地层钻开与随钻电阻率测量的具体时间,从而计算出测井延迟(钻井液浸泡)时间,进行了时间推移下视电阻率变化规律的统计,共统计了 9 口井数据,包括:测井延迟时间、钻井液柱压力、地层物性参数(孔隙度、渗透率)、测井视电阻率和电阻率反演结果等(表 3)。

表 3 侵入规律多元统计参数

Table 3 Multivariate statistical parameters for invasion patterns

延迟时间/ h	孔隙度/ %	渗透率/ mD	钻井液柱压力/ MPa	P16H/ ($\Omega \cdot m$)	P40H/ ($\Omega \cdot m$)	A16H/ ($\Omega \cdot m$)	A40H/ ($\Omega \cdot m$)	r_i / m	R_{so} / ($\Omega \cdot m$)	R_i / ($\Omega \cdot m$)
0.75	17.37	25.69	54.76	5.28	5.78	5.68	6.14	0.35	3.74	7.35
0.82	17.61	30.04	55.69	3.72	4.53	4.94	5.84	0.26	0.73	5.78
0.82	17.83	34.38	55.38	4.47	6.75	7.44	8.81	0.43	2.50	9.77
0.82	18.14	41.96	55.49	4.95	7.50	8.23	9.26	0.41	2.90	10.22
0.82	18.75	62.00	55.63	4.57	6.48	6.84	8.21	0.55	3.73	10.07
0.84	18.00	38.33	54.60	7.16	9.29	9.54	10.43	0.48	4.22	12.43
0.85	17.64	30.49	54.86	6.92	8.11	8.12	8.77	0.38	3.06	10.03
0.88	17.57	29.28	55.07	4.29	4.49	4.57	4.71	0.19	2.58	4.79
...
0.92	17.64	30.56	55.16	5.47	5.76	6.31	5.88	0.27	3.82	6.60
0.92	18.35	48.05	55.37	4.78	6.71	7.26	7.28	0.25	2.33	7.75
0.98	18.35	48.05	56.30	15.42	12.97	12.37	12.27	0.42	7.42	20.14
0.98	18.84	65.67	56.24	15.98	13.40	14.07	13.66	0.33	2.97	18.30
1.07	15.98	10.57	54.06	6.12	8.81	10.62	10.32	0.49	3.99	11.94
1.07	15.98	10.57	54.06	6.12	8.81	10.62	10.32	0.49	3.99	11.94
1.07	15.98	10.57	54.12	6.33	8.92	10.91	9.89	0.39	4.07	11.25
1.07	18.01	38.59	54.04	8.19	10.74	11.11	12.35	0.41	3.47	14.17
1.07	16.59	15.62	54.24	7.11	11.65	14.22	13.06	0.40	4.01	15.58
1.07	18.83	65.24	53.69	9.67	14.63	14.79	16.90	0.39	3.27	19.91
...
17.73	16.75	17.33	54.95	2.42	3.45	3.96	6.89	0.73	2.43	9.70
17.95	16.08	11.31	54.92	2.70	3.52	4.12	6.02	0.85	3.03	9.34
19.77	17.61	29.89	54.19	2.77	4.67	4.94	10.40	0.64	2.34	18.05
21.00	18.01	38.59	54.04	2.75	4.68	4.93	10.38	0.60	1.86	16.07
22.45	17.38	15.81	53.92	2.71	4.39	4.72	9.99	0.65	2.20	15.89
24.80	18.83	65.24	53.69	2.93	4.84	5.19	12.10	0.50	1.21	19.67
26.10	18.38	48.82	56.91	2.77	4.14	4.69	7.15	0.59	1.89	9.99
26.75	17.69	31.51	53.59	7.55	13.00	13.31	17.35	0.41	2.73	19.30
28.52	17.85	28.64	54.47	3.08	3.75	4.45	7.15	0.74	2.61	11.69
28.85	16.59	34.94	54.40	2.76	3.15	3.76	6.78	0.78	2.39	12.53
30.47	16.59	15.62	54.38	2.76	3.10	3.64	6.49	1.06	2.96	20.83
30.92	17.69	31.51	53.49	4.77	6.88	7.36	13.48	0.46	1.92	18.61
31.00	16.59	15.62	53.42	4.04	4.58	5.36	9.28	0.43	0.86	13.00
...
56.52	17.69	31.51	53.49	2.64	3.67	4.12	9.48	0.60	10.21	28.09
56.62	16.59	15.62	53.42	2.43	3.17	3.47	7.52	0.54	18.79	20.87
57.55	16.59	15.62	53.41	2.80	3.39	3.87	6.91	0.52	19.08	21.20
118.70	17.57	29.19	55.28	3.15	3.08	3.78	4.68	1.15	2.80	18.07
119.40	16.29	12.90	55.24	3.31	3.20	3.88	4.50	1.16	2.95	16.70
119.50	15.92	10.19	55.22	3.08	3.02	3.59	4.18	1.18	3.70	9.86
119.80	17.78	33.48	55.19	2.24	2.20	2.85	3.66	1.12	2.64	7.82

图 8(a)为时间推移下气层归一化视电阻率变化规律统计。其中,归一化视电阻率定义为随钻测井 R_{P40H} 与地层真电阻率 R_t 的比值。

由图 8(a)可知,对于气层,由于测井延迟时间增加的同时钻井液侵入深度增加,导致测井视电阻率偏离地层电阻率越来越大,归一化视电阻率逐渐减小。约在 3d 后,视电阻率变化趋于稳定。拟合得到的 \bar{R}_n 与测井延迟时间 t 的关系:

$$\bar{R}_n = 0.60913e^{-1.1826t} + 0.20014 \quad (12)$$

为探索气层视电阻率变化背后的钻井液侵入规律,结合地层物性参数、钻井液柱压力、钻井液浸泡时间和测井电阻率分离因子等参数,进行了钻井液侵入深度与多参数关系的多元统计,得到相应的统计关系:

$$\ln \frac{r_i}{r_h} = \frac{129.1K^{0.2}p_m^{0.5}}{e^{(1-S_{phls})(S_{ahls}-0.2)}\phi^2} \cdot (-0.0356e^{-1.90262t} + 0.0591) \quad (13)$$

由式(13)知,钻井液侵入深度与地层渗透率、钻井液柱压力和测井延迟(钻井液浸泡)时间成正比,与地层孔隙度成反比。根据式(13)可进行钻井液侵入深度预测与评价。

定义规范化侵入半径 r_{is} 为:

$$r_{is} = \frac{7.746 \times 10^{-3} e^{(1-S_{phls})(S_{ahls}-0.2)} \cdot \phi^2}{K^{0.2} p_m^{0.5}} \cdot \ln \frac{r_i}{r_h} + 0.035 \quad (14)$$

则规范化侵入半径随时间变化规律为:

$$r_{is} = -0.0182e^{-1.89572t} + 0.0659 \quad (15)$$

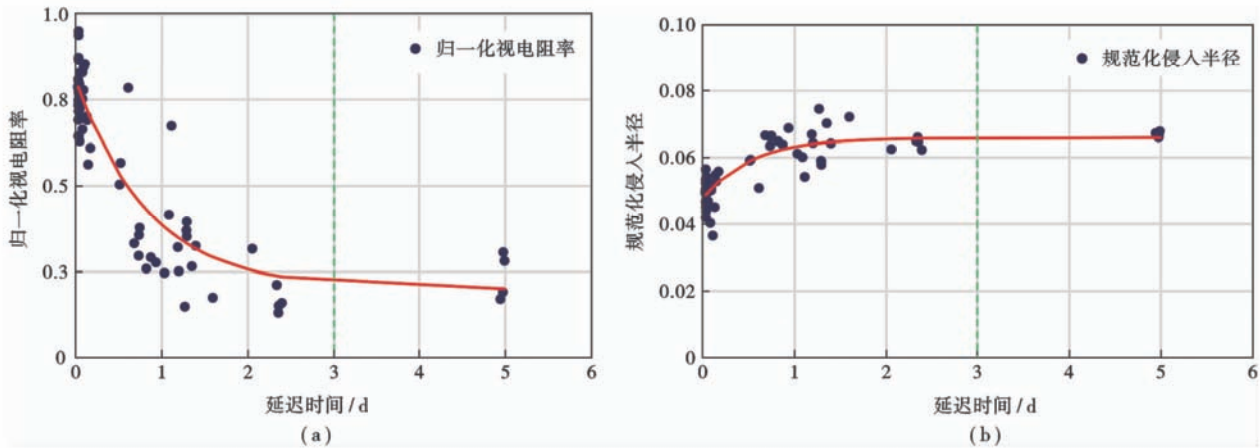


图 8 时间推移下气层归一化视电阻率和规范化侵入半径的变化规律统计

Fig. 8 Variation statistics of normalized apparent resistivity, standardization invasion radius from time-lapse logging measurements in gas reservoirs

如图 8(b)所示,规范化侵入半径随着延迟时间的增加而增加,约 3d 趋于稳定。

需要注意的是,钻井液侵入油气储层的物理过程复杂,受地层物性、储层流体性质、钻井液性能、井况等多种因素的影响,既有一定的规律可循,又有其不确定性,必须结合区块情况具体分析^[24]。

5 结 论

(1) 通过开展随钻电磁波电阻率 20 条测井曲线联合反演,实现了对不同工作频率下幅度衰减与相位差电阻率测井的分辨率与探测深度的有效匹配,获取了真实地层电阻率和钻井液侵入深度。理论计算表明基于电阻率测井曲线分离程度的反演参数初始值选取方案可行、精度满足工程应用需求,各项地层模型参数反演相对误差小于 0.5%,时间推移测井资料反演成果对比验证表明资料处理成果可靠。

(2) 针对存在钻井液低侵现象的东方区块 13 口井随钻测井资料开展电阻率反演应用。不同储层地层电阻率与随钻测井视电阻率大小关系的统计结果显示,含油(气)饱和度越高的储层随钻测井视电阻率受钻井液侵入影响越严重。因此通过电阻率反演进行测井资料的综合环境校正对海上随钻电阻率测井十分必要,对储量计算与储层评价也十分重要。

(3) 基于资料处理成果的钻井液侵入规律多元统计的探索性研究,获得了侵入深度与地层物性、地层电性变化、钻井液性能、钻井液浸泡时间等方面参数间的关系式,该关系式能够描述客观侵入特征。统计结果表明钻井液浸泡 3d 后侵入深度不再受时间推移因素影响,这一成果对钻井液侵入深度预测与评价有参考价值。

(4) 通过联合反演方法实现了随钻电阻率测井的精确反演,通过多线程并行计算可以提高反演计算速

度,为随钻电阻率反演在工程应用中走向实用化奠定了基础。今后还需要进一步研发三维随钻电阻率测井反演技术,并将更加高效的并行计算技术引入到随钻电阻率测井反演中,以实现三维随钻电阻率测井的准确快速反演,为随钻测井在大斜度井、水平井中的地层评价与地质导向作用进一步提供技术保障。

符号注释: V_1 、 V_2 —分别为接收线圈 R1 和 R2 的电动势, V; E_{ATT} —幅度衰减, dB; ϕ_1 、 ϕ_2 —分别为接收线圈 R1 和 R2 的相位角, °; $\Delta\phi$ —相位差, °; d_p —探测深度, m; σ_a 、 σ_{xo} 、 σ_l —分别为视电导率、侵入带电导率、地层电导率, S; x —待反演参数, 单位由具体参数确定; m —测井曲线个数, $m=20$; y_k —随钻 20 条测井曲线; f_k —由随钻正演算法计算所得的相应的 20 条电阻率曲线; S_{phls} 、 S_{lhap} 、 S_{plls} 、 S_{ahls} 、 S_{alls} —P40H、P16H 曲线, A40H、P40H 曲线, P40L、P16L 曲线, A40H、P16H 曲线, A40L、P16L 曲线的分离因子, 无量纲; R_{P40H} 、 R_{P16H} 、 R_{A40H} 、 R_{P40L} 、 R_{P16L} 、 R_{A16H} 、 R_{A40L} 、 R_{A16L} —P40H、P16H、A40H、P40L、P16L、A16H、A40L、A16L 曲线的电阻率, $\Omega \cdot m$; r_i —侵入半径, m; R_{xo} —随钻侵入带电电阻率, $\Omega \cdot m$; R_l —地层电阻率, $\Omega \cdot m$; r_{i0} —初始侵入半径, m; R_{xo0} —初始随钻侵入带电电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{l0} —初始地层电阻率, $\Omega \cdot m$; d_h —井眼直径, m; R_m —钻井液电阻率, $\Omega \cdot m$; $E_{r_{i0}}$ —初始侵入半径相对误差, %; $E_{R_{xo0}}$ —初始随钻侵入带电电阻率相对误差, %; $E_{R_{l0}}$ —初始地层电阻率相对误差, %; r_{i1} —反演侵入半径, m; R_{xo1} —反演随钻侵入带电电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{l1} —反演地层电阻率, $\Omega \cdot m$; $E_{r_{i1}}$ —反演侵入半径相对误差, %; $E_{R_{xo1}}$ —反演随钻侵入带电电阻率相对误差, %; $E_{R_{l1}}$ —反演地层电阻率相对误差, %; R_{11} 、 R_{12} —主测与复测电阻率地层电阻率, $\Omega \cdot m$; \bar{R}_a 、 R_a —视电阻率, $\Omega \cdot m$; K —渗透率, mD; p_m —钻井液柱压力, MPa; ϕ —孔隙度, %; r_h —井眼半径, m; t —测井延迟时间, d; r_{is} —规范化侵入半径, 无量纲。

致谢 特别感谢杭州迅美科技有限公司的张中庆和罗虎对本文的技术指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] 冯进. 随钻测井在地层评价中的应用[J]. 中国海上油气(地质), 2002, 16(3): 200-206.
Feng Jin. An application of logging while drilling (LWD) in formation evaluation[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2002, 16(3): 200-206.
- [2] Gianzero S, Chemali R, Su S M. Induction, resistivity and MWD tools in horizontal wells[C]//SPWLA 30th annual logging symposium, Denver, Colorado, USA; SPWLA, 1989.
- [3] Heidari Z, Torres-Verdin C, Preeg W E. Improved estimation of mineral and fluid volumetric concentrations from well logs in thinly bedded and invaded formations[J]. Geophysics, 2012, 77(3): 79-98.
- [4] 杨震, 杨锦舟, 韩来聚. 随钻电磁波电阻率测井实时井眼影响校正[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 625-629.
Yang Zhen, Yang Jinzhou, Han Laiju. A real-time borehole correction of electromagnetic wave resistivity logging while drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 625-629.
- [5] 魏宝君, 张克, 欧永峰, 等. 采用混合法和递推矩阵算法模拟层状介质中随钻电磁波电阻率测量仪器的响应[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 61-69.
Wei Baojun, Zhang Ke, Ou Yongfeng, et al. Simulating electromagnetic wave resistivity MWD tool's response in stratified media using hybrid method and recursive matrix algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2013, 37(1): 61-69.
- [6] 刘得军, 马中华, 苑赫, 等. 自适应高阶矢量有限元方法在随钻电阻率测井中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(4): 77-83.
Liu Dejun, Ma Zhonghua, Yuan He, et al. Application of adaptive higher-order vector finite element method to simulate resistivity logging-while-drilling tool response[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2012, 36(4): 77-83.
- [7] 高杰, 冯启宁. 随钻电阻率测井与地层电性各向异性评价—研究与应用报告综述[C]//1999年测井技术信息交流会论文集. 武汉: 中国石油天然气集团公司, 1999: 34-40.
Gao Jie, Feng Qining. Assessment of formation electrical anisotropy and resistivity logging while drilling—review of research and application report[C]//Proceedings of Well Logging Technical Information Exchange in 1999. Wuhan: China National Petroleum Corporation, 1999: 34-40.
- [8] 刘之的. 随钻测井响应反演方法及应用研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
Liu Zhidi. Studying on inversion method and application of logging while drilling response[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.
- [9] 康俊佐, 邢光龙, 杨善德. 电磁传播电阻率测井的二维全参数反演方法研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 275-283.
Kang Junzuo, Xing Guanglong, Yang Shande. A study on the two dimensional full parameter inversion method of the electromagnetic propagation resistivity logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 275-283.
- [10] Zhou Q, Hillier D J. WMD-PWR 测井仪的几何因子和自适应反褶积[J]. 李清亮. 测井译丛, 1993(1): 17-25.
Zhou Q, Hillier D J. Geometry factor of WMD-PWR logging tools and adaptive deconvolution[J]. Li Qingliang. Logging Renditions, 1993(1): 17-25.
- [11] 史晓锋, 李铮, 蔡志权. 随钻电磁波传播电阻率测井的快速反演新方法[J]. 测井技术, 2001, 25(4): 266-269.
Shi Xiaofeng, Li Zheng, Cai Zhiquan. A new inversion method of LWD electromagnetic propagation resistivity logging [J]. Well Logging Technology, 2001, 25(4): 266-269.

- [12] 冯庆国,杨善德. 电磁波传播电阻率测井资料反演方法的理论研究[C]//1997年中国地球物理学会第十三届学术年会论文集. 北京:中国地球物理学会,1997:153.
Feng Qingguo, Yang Shande. Theoretical study on the inversion method of electromagnetic wave propagation resistivity logging datum[C]//The thirteenth annual academic conference of the Chinese geophysical society in 1997. Beijing: Chinese Geophysical Society, 1997: 153.
- [13] 康俊佐,杨善德. 电磁波电阻率测井的二维全参数反演[J]. 测井技术, 2007, 31(4): 314-320.
Kang Junzuo, Yang Shande. 2-D full-parameter inversion of electromagnetic wave resistivity log[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(4): 314-320.
- [14] 何委徽,王家林,于鹏. 地球物理联合反演研究的现状与趋势分析[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 530-540.
He Weihui, Wang Jialin, Yu Peng. Overview of the status and prospect of geophysical joint inversion[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 530-540.
- [15] Jorge A. Field examples of the combined petrophysical inversion of gamma-ray, density and resistivity logs acquired in thinly-bedded classic rocks formation[C]//SPWLA 50th annual logging symposium. Woodlands, TX: SPWLA, 2009.
- [16] 张立山,修华. 随钻电磁波电阻率测井理论分析[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2012, 26(3): 15-18.
Zhang Lishan, Xiu Hua. Theoretical analysis of electromagnetic wave resistivity logging while drilling[J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2012, 26(3): 15-18.
- [17] 陈爱新. 随钻电阻率测井仪器探测特性分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 61-62.
Chen Aixin. Instrument analysis of resistivity logging-while-drilling[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 61-62.
- [18] 高杰,辛秀艳,陈文辉,等. 随钻电磁波电阻率测井之电阻率转化方法与研究[J]. 测井技术, 2008, 32(6): 503-507.
Gao Jie, Xin Xiuyan, Chen Wenhui, et al. Resistivity derivation in electromagnetic wave propagation resistivity logging while drilling[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(6): 503-507.
- [19] 史晓锋,李铮,蔡志权. 随钻电磁波传播电阻率测量工具探测深度研究[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 113-117.
Shi Xiaofeng, Li Zheng, Cai Zhiquan. Investigation depth of MWD propagation resistivity logging[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(2): 113-117.
- [20] 徐果明. 反演理论及其应用[M]. 北京:地震出版社, 2003.
Xu Guoming. Theory of inversion and its application[M]. Beijing: Seismological Press, 2003.
- [21] 张中庆,穆林雪,张雪,等. 矢量有限元法在随钻电阻率测井模拟中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(4): 64-71.
Zhang Zhongqing, Mu Linxue, Zhang Xue, et al. Application of vector finite element method to simulate logging while drilling resistivity tools[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2011, 35(4): 64-71.
- [22] 张庚骥. 电法测井:下册[M]. 北京:石油工业出版社, 1986.
Zhang Gengji. Electrical logging: Volume II [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.
- [23] 高杰,柯式镇,魏宝君,等. 电法测井数值模拟现状及发展趋势分析[J]. 测井技术, 2010, 34(1): 1-5.
Gao Jie, Ke Shizhen, Wei Baojun, et al. Introduction to numerical simulation of electrical logging and its development trend[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(1): 1-5.
- [24] 刘尊年,孙建孟,迟秀荣,等. 泥浆侵入研究现状分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2594-2601.
Liu Zunnian, Sun Jianmeng, Chi Xiurong, et al. Analysis of research present situation of mud invasion[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2594-2601.

(收稿日期 2015-08-05 改回日期 2016-01-25 编辑 王培玺)

版权所有